

# Investigation of Ultra-Precision Machining on Single Crystal Silicon Using Molecular Dynamics Simulation and Experiments

S. N. Ameli Kalkhoran<sup>1\*</sup>, M. Vahdati<sup>1</sup>, J. Yan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Keio University, Yokohama, Japan

**ABSTRACT:** Ultra-precision machining is an advanced method for production of materials with nanoscale surface roughness. It is widely used in the manufacturing of precision components for defense, aerospace, optics, and electronics industries. For this feature, only a few industrial countries have access to this technology. Due to the high precision of this technology, many factors can affect the final surface quality. Machine components, machining conditions, tool geometry and material, environmental condition, workpiece material as well as vibration, are among the factors that are reviewed in this article. Afterwards, the effect of cutting depth on machining mechanism and surface quality is investigated using molecular dynamics investigation. The results revealed that when the ratio of cutting depth to tool edge radius becomes lower than 0.5, the effective rake angle would be bigger than the nominal rake angle. Furthermore, under this condition, the dominant machining mechanism is extrusion, which is different from the micro cutting mechanism. Finally, a series of experiments was conducted to study the impact of the undeformed chip thickness on the chip morphology and surface topography. For this purpose, field emission scanning electron microscopy, 2D ultra-precision point autofocus probe as well as white light interferometer were exploited. The results indicated that at the lower relative tool sharpness, chip edge tearing occurs. Besides, by increasing this parameter to 100 nm, silicon nano-ribbons is created.

## Review History:

Received: 9/26/2018

Revised: 2/21/2019

Accepted: 3/11/2019

Available Online: 3/23/2019

## Keywords:

Ultra-precision machining

Nanometric machining

Surface roughness

Single-crystal silicon

Molecular dynamics simulation

## 1- Introduction

Ultra-Precision Machining (UPM) is an advanced method by which 0.1-1  $\mu\text{m}$  form accuracy and 1-10 nm surface roughness is achievable [1]. Nowadays, the trace of this process could be found in lots of products. For instance, camera lenses, laser scanners, medical and defense sensors as well as contact lenses are all cases which this technology has been used. Using this method, ductile mode machining of brittle materials such as silicon is possible; which increases the surface integrity [2]. Since a lot of parameters could affect the surface roughness in this process, many researches have been done on the relationship between these factors and the final surface finish. Some studies have tried to provide an ideal model between different kinds of surface roughnesses [3] and machining variables [4]. However, most of the researches have focused on two areas of simulation [5] and empirical experiments [6].

In the current study, a set of molecular dynamics simulations was conducted to examine the effect of tool edge radius on the cutting mechanism and surface quality. Moreover, this parameter was experimentally investigated. In this regard, chip morphology as well as surface topography were studied.

## 2- Methodology

### 2-1- Molecular dynamics simulation

Due to the submicrometer undeformed chip thickness in

\*Corresponding author's email: naderameli@mail.kntu.ac.ir

UPM process, it is impossible to use finite element method for simulations. The reason for this is the limitation of continuum mechanics in the nano and atomic-scale dimensions. Molecular Dynamics (MD) is an alternative approach for nanometric studies, such as UPM. This method based on interatomic interactions and their motion equations.

Fig. 1 indicates the schematic model used in MD simulations. Single crystal diamond cubic silicon workpiece with the cutting plane of (001) is defined. Additionally, for machining, a 3-nm diamond tool in the cutting direction of [0 -1 0] is used. The interaction between Si-Si and Si-C particles are described by Tersoff potential function [8].

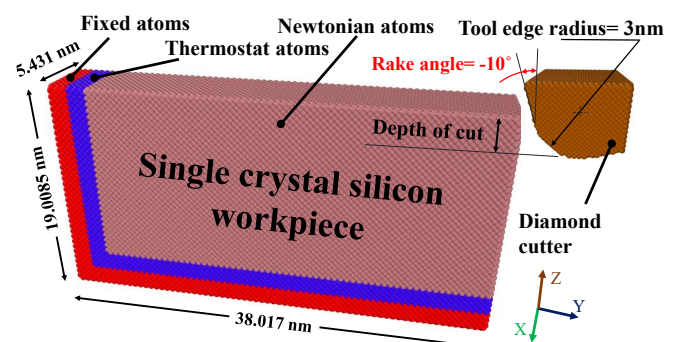


Fig. 1. Schematic of molecular dynamics model for ultra-precision machining of silicon substrate.

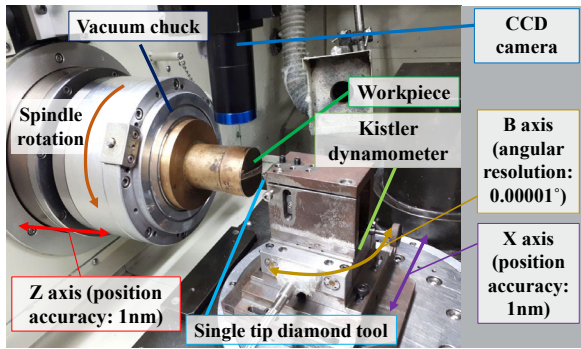


Fig. 2. Interior view of the 3-axis control ultra-precision machine.

### 2-2- Empirical experiment

A 3-axis ultra-precision machine (NACHI ASP-15, Japan- Fig. 2) was used for machining a p-type single crystal silicon wafer with plane orientation (110). Furthermore, a single crystalline diamond tool (Tokyo Diamond Corp., Japan) with the nose radius of 10 mm, edge radius of 100 nm as well as rake and clearance angle of 0° and 8°, respectively, was employed. The machined surfaces were examined by an ultra-precision point autofocus 2D probe (with the precision of 100 nm) and a white light interferometer. Finally, a Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM, Model Inspect F50) was used to observe the sample surfaces.

Three different undeformed chip thickness of 25, 50 and 100 nm were used to apply the same Relative Tool Sharpness (RTS) ratios in MD simulations (0.25, 0.5 and 1). A constant 5- $\mu$ m depth of cut was also used in all conditions. Besides that, the cutting speed was adjusted as 50 m/s. This was done by changing the spindle rotation rate at different cutting diameters.

### 3. Results and Discussion

Simulation results indicate that the dominant mechanism at RTS=0.25 is extrusion. By increasing RTS to 0.5, the shearing mechanism starts as the conventional machining. In this

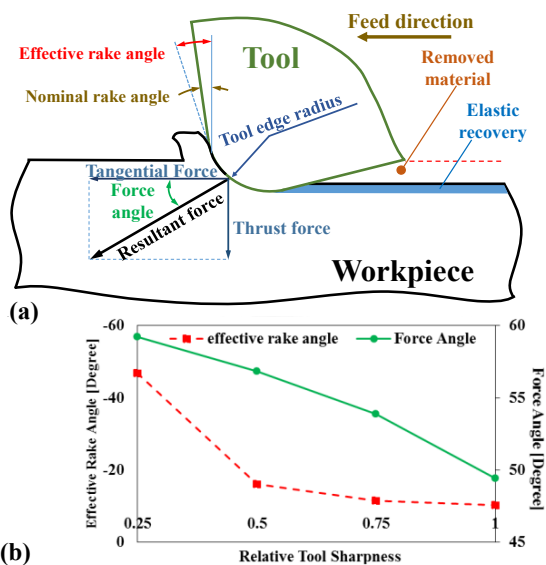


Fig. 3. a). Nanoscale cutting mechanism, b). Influence of RTS on effective rake angle and force angle.

circumstance, more volume of the surface atoms is pushed toward the chip. This mechanism also continues up to RTS=1; and hence, there is no appreciable difference on the machined surfaces.

As demonstrated in Fig. 3 (a), owing to the minor undeformed chip thickness in the nanometric machining, the effective rake angle is different from the nominal rake angle. As can be seen in Fig. 3.(b), the bigger effective rake angles occur at the lower depths of cut. It is also observed that increasing the RTS to 1, results in changing the effective rake angle to the nominal rake angle (-10°). This is because of changing the material removal mechanism from nanometric to conventional machining. Under this condition, the rake face will be in contact to the particles into the material flow, instead of the cutting edge.

The results of force angle also show almost the same trend. In the extrusion mechanism, a large number of atoms in front of the tool was compressed beneath the cutting edge and makes the freshly machined surface. This highly hydrostatic pressure leads to the maximum value in the force angle. As the depth of cut increases, the more portion of the particles is transformed into the chip, which results in dropping the force angle.

Fig. 4 illustrates the FE-SEM micrograph of cutting chips at different RTS ratios. Although silicon has a brittle nature, continuous chip and consequently, ductile mode machining is seen at RTS=0.25. However, sporadic chip edge tearing is observed. Due to the variation along the undeformed chip thickness, the stress concentration is higher in the thinner edge and as a result, chip edge tearing takes place. By increasing RTS up to 0.5, the cutting chips are still continuous, with the difference that there is no chip edge tearing. The continuous-form chips remain still at RTS=1. However, more magnification demonstrates that it is not quite continuous and nano ribbons are formed.

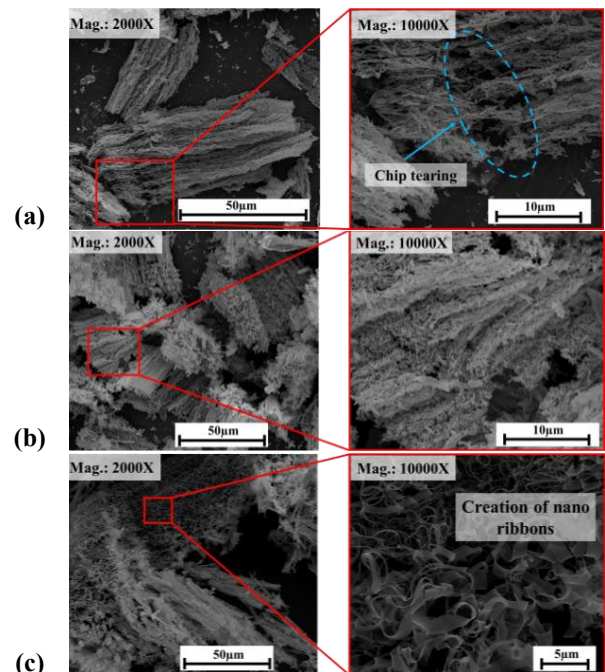


Fig. 4. FE-SEM micrograph of chips obtained at RTS of a. 0.25, b. 0.5 and c. 1.

#### 4. Conclusion

Ultra-precision Machining (UPM) process was explained in this study. Next, Molecular Dynamics (MD) simulations and empirical experiments were carried out on single crystal silicon wafers. The main conclusions are as below:

- Although the ultra-precision machine tool is similar to the conventional machines, the movement mechanism of the machine tool, and consequently, material removal behavior vary with each other.
- Simulational results demonstrate that the least relative tool sharpness (RTS) for chip formation is 0.25. In this circumstance, extrusion mechanism is dominant and the effective rake angle increases dramatically.
- Despite the brittle nature of silicon substrate, the ductile mode cutting is achievable at the RTS ratios below than 1.
- Although the single crystal diamond was used as the cutting tool, different types of tool wear are still inevitable and result in non-uniformity on the machined surface. Tool adhesion is also seen on the cutting edge which results in various roughnesses along the machined surface.

#### References

- [1] E. Brinksmeier, *Diamond Machining*, Encyclopedia of Production Engineering, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] S. N. Ameli Kalkhoran, M. Vahdati, and J. Yan, Investigation on the effect of workpiece dimension in nanometric machining of monocrystalline silicon by molecular dynamics simulation, *Mechanical Engineering (University of Tabriz)*, (2019) in press (in Persian).
- [3] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Enhancement of low power CO<sub>2</sub> laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, 96 (2017) 208–218.
- [4] D. J. Whitehouse, *Handbook of surface metrology*. CRC Press, 1994.
- [5] M. Vahdati, and S. A. Rasouli, Vibration Simulation of Air Slide Table in Ultra Precision Machines, *Applied Mechanics and Materials*, 66–68 (2011) 2158–2163.
- [6] M. Akhondzadeh, and M. Vahdati, Air pocket effects on air spindle vibrations in nanomachining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*, 228 (3) (2013) 328–336.





## بررسی فرآیند ماشین کاری فوق دقیق با استفاده از شبیه سازی دینامیک مولکولی و آزمایش های تجربی سیلیکون تک کریستال

سید نادر عاملی کلخوران<sup>۱\*</sup>، مهرداد وحدتی<sup>۱</sup>، جیوانگ یان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
<sup>۲</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کیو، یوکوهاما، ژاپن

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷-۰۷-۰۴  
بازنگری: ۱۳۹۷-۱۲-۰۲  
پذیرش: ۱۳۹۷-۱۲-۲۰  
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸-۰۱-۰۳

### کلمات کلیدی:

ماشین کاری فوق دقیق  
ماشین کاری نانومتری  
صافی سطح  
سیلیکون تک کریستال  
شبیه سازی دینامیک مولکولی

**خلاصه:** فرآیند ماشین کاری فوق دقیق قطعات، روشی بسیار پیشرفته جهت نیل به دقت ابعادی و صافی سطح در حد نانومتر می باشد. این فرآیند کاربرد وسیعی در تولید قطعات دقیق صنایع دفاعی، هوافضا، اپتیک و الکترونیک داشته و فقط تعداد محدودی از کشورهای صنعتی به فناوری آن دسترسی دارند. با توجه به دقت بسیار بالای این فرآیند، عوامل زیادی می توانند بر کیفیت سطح نهایی تأثیر بگذارند. اجزاء ماشین ابزار، شرایط ماشین کاری، هندسه و جنس ابزار، شرایط محیطی، جنس قطعه کار و ارتعاشات، از جمله این عوامل می باشند که در این مقاله به بررسی آن ها پرداخته شده است. در ادامه، با استفاده از روش شبیه سازی دینامیک مولکولی به بررسی تأثیر عمق ماشین کاری بر مکانیزم برش و کیفیت سطح پرداخته شد. نتایج مشخص کرد هنگامی که نسبت عمق ماشین کاری به شعاع لبه ابزار کمتر از ۰/۵ باشد، زاویه پیشانی مؤثر، بزرگتر از زاویه پیشانی اسمی ابزار خواهد بود. همچنین تحت این شرایط، مکانیزم ماشین کاری متفاوت از مکانیزم میکروبراده برداری بوده و بصورت اکستروژن می باشد. در انتها، با انجام مجموعه ای از آزمایش های تجربی، تأثیر عمق براده برداری بر شکل براده و کیفیت سطح صورت پذیرفت. بدین منظور از میکروسکوپ الکترونی روبشی، دستگاه اندازه گیری فوق دقیق دوبعدی و همچنین تداخل سنج نور سفید استفاده شد. نتایج نشان دهنده گسیختگی براده ها در عمق براده برداری پایین و همچنین تشکیل نانو-زبان های سیلیکونی در عمق براده برداری ۱۰۰ نانومتری بود.

### ۱- مقدمه

CNC با کنترل کننده های رایانه ای، سروموتورهای سریع و ریل های لغزشی هوایی بود.

طبق تعریف تانینگوچی [۴]، دقت ماشین کاری عبارت است از بیشترین دقت ابعادی که در یک زمان می توان به آن دست یافت. شکل ۱ روند توسعه صنعت ماشین کاری فوق دقیق را نشان می دهد. با توجه به سرعت گسترش این حوزه، باید توجه داشت که مفهوم واژه دقیق نیز همواره در حال تغییر می باشد.

بطور عمومی منظور از ماشین ابزارهای فوق دقیق، ماشین آلات تراشکاری و فرزکاری با ابزار الماس می باشد. ساختمان دستگاه ماشین ابزار فوق دقیق از نظر حرکت شناسی شبیه به دستگاه تراشکاری معمولی می باشد. اما با این حال، نرخ حرکت، عمق برش و نیروهای ماشین کاری آن، بطور قابل ملاحظه متفاوت می باشد. همچنین بمنظور کاهش اصطکاک، در کله گی و میز این ماشین ها به جای استفاده از یاتاقان های معمولی، عموماً از یاتاقان های هوایی<sup>۲</sup> و هیدرواستاتیک

واژه ماشین کاری فوق دقیق<sup>۱</sup> معمولاً اشاره به فرآیندهایی دارد که منجر به دقت ابعادی بین ۰/۱ تا ۱ میکرومتر و صافی سطح در حدود ۱ تا ۱۰ نانومتر شود [۱ و ۲]. این فرآیند می تواند از نوع مکانیکی، شیمیایی و یا فیزیکی باشد. تاریخچه فرآیند ماشین کاری فوق دقیق تا حد زیادی به توسعه ماشین آلات دقیق گره خورده است. عصر مدرن این حوزه از دهه ۶۰ میلادی و عمدتاً در حوزه نظامی آغاز گردید. اندکی بعد، شرکت فیلیپس برای نخستین بار شروع به تولید نوع تجاری ماشین آلات فوق دقیق نمود. کاربرد عمده این دستگاه ها در آن زمان تولید لنزهای خوانش دیسک های فشرده کامپیوتری بود [۳]. در ادامه، با توسعه بیشتر این صنعت امکان تولید بسیاری از قطعات دقیق فلزی، نیمه رساناها، پلاستیک ها و شیشه ها نیز مهیا گردید. نقطه بلوغ این فرآیند ارائه ابزارهای الماسه دقیق، ماشین های

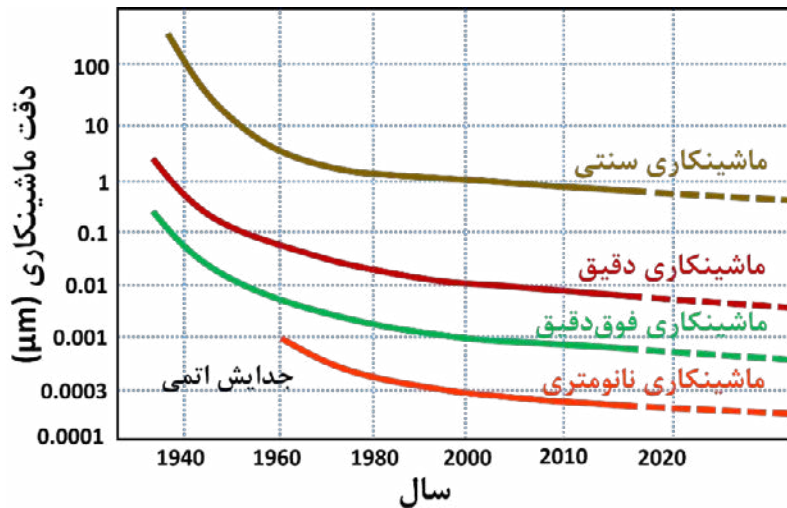
1 Ultra-Precision Machining (UPM)

\* نویسنده عهده دار مکاتبات: naderameli@mail.kntu.ac.ir

2 Air bearing

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس <https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode> دیدن فرمائید.





شکل ۱: روند توسعه دقت ماشینکاری.

Fig. 1. Trend of machining accuracy development

ارتعاشات، شرایط محیطی و اعوجاج حرارتی. از آنجایی که فاکتورهای زیادی به صورت مستقیم و غیرمستقیم بر صافی سطح حاصل از این فرآیند تأثیرگذارند، تحقیقات بسیار زیادی در مورد ارتباط این فاکتورها با صافی سطح انجام شده است. در دهه ۶۰ میلادی، به خاطر استفاده از یاتاقان‌های روانساز گازی<sup>۱</sup> در اسپیندل‌های هوایی، پیشرفت چشمگیری در ماشینکاری فوق‌دقیق حاصل گردید [۸]. هم‌اکنون، از اسپیندل‌های هوایی که دقت و سفتی بالایی دارند، به خاطر اصطکاک و تولید حرارت پایینشان، به طور گسترده در ماشین‌ابزارهای ماشینکاری فوق‌دقیق استفاده می‌شوند.

برخی از تحقیقات سعی بر ارائه یک مدل ایده‌آل بین انواع زبری سطح و شرایط ماشینکاری نموده‌اند [۹]. این زبری‌ها شامل زبری سطح متوسط ( $R_a$ ) برابر با قدرمطلق میانگین ارتفاع قله‌های پروفیل سطح و حداکثر ارتفاع زبری ( $R_z$ ) برابر با تفاوت ارتفاع بالاترین قله با پایین‌ترین دره در طول اندازه‌گیری می‌باشند [۱۰]. با این حال، زبری سطح به دست آمده از این روابط همواره کمتر از زبری سطح تولید شده در فلزات غیرآهنی بوده است [۱۱].

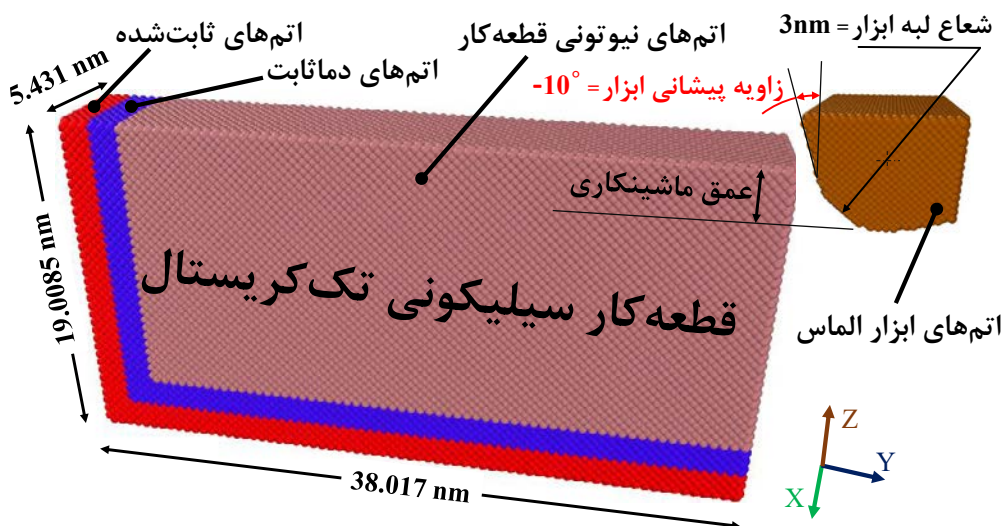
ارتعاشات یک پدیده فیزیکی است که در فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق نیز وجود دارد. حتی یک ارتعاشات نسبی کوچک بین ابزار و قطعه‌کار، می‌تواند منجر به آسیب صافی سطح گردد [۱۲]. بطور کلی، ارتعاشات موجود در فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: ارتعاشات قطعه‌کار، ارتعاشات

استفاده شده است [۵].

با توسعه صنعت نانو در مقیاس تجاری، می‌توان در بسیاری از تجهیزات ردپایی از فناوری ماشینکاری فوق‌دقیق را جست. به طور مثال موشواره‌های رایانه، سیستم خوانش DVD، لنزهای دوربین، اسکنرهای بارکد، نوارهای شبرنگ و لنزهای چشمی، همگی مواردی هستند که در آن‌ها از این فناوری استفاده شده است. علاوه بر این، می‌توان از اجزاء اپتیکی ماشینکاری شده با الماس، در سیستم‌های پروژکتورها، نمایشگرها، اسکنرهای لیزری، حسگرهای پزشکی و دفاعی، هدایت‌کننده‌های پرتوی لیزر و همچنین سیستم‌های روشنایی استفاده کرد. در تولید این محصولات نیاز به ماشینکاری فوق‌دقیق سطوح تخت، محدب و فرسnel وجود دارد. این پرداخت سطح، بسته به شرایط ماشینکاری و خواص ماده، بین ۱۰-۱ nm و دقت ابعادی آن بسته به اندازه، شکل و پیچیدگی قطعه، بین ۰/۱ تا ۱ میکرومتر (نوک تا کف) می‌باشد [۶]. استفاده از این تکنولوژی فقط به ماشینکاری قطعات حجیم سیلیکونی محدود نشده و حتی تحقیقاتی بر روی قطعه‌کارهای سیلیکونی متخلخل صورت پذیرفته است [۷].

فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق توانایی تولید اجزای پیشرفته با دقت ابعادی بالا و صافی سطح نانومتری را دارد. با این حال، هر متغیری می‌تواند بر چنین صافی سطحی تأثیرگذار باشد. به طور مشخص، با انتخاب بهینه فاکتورها، می‌توان به کیفیت سطح بهتری دست یافت. فاکتورهای عمومی به طور خلاصه عبارتند از ماشین‌ابزار، شرایط برش، هندسه ابزار، خواص ماده، شکل‌گیری براده، پوشش ابزار،

1 Gas lubricated bearing



شکل ۲: شمای مدل دینامیک مولکولی فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق قطعه کار سیلیکونی تک کریستال.

Fig. 2. Schematic of molecular dynamics model for ultra-precision machining of silicon substrate.

## ۲- شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

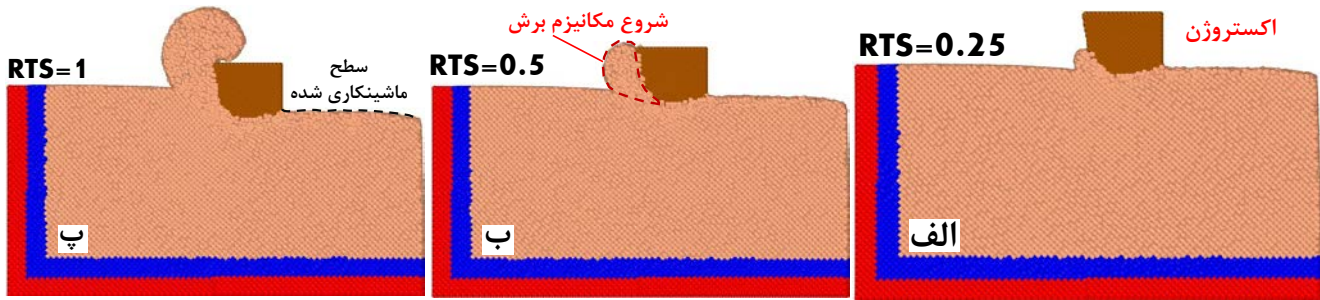
شبیه‌سازی فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق از یک سو امکان بررسی فرآیند را با هزینه کم مهیا کرده و از سوی دیگر این اجازه را به محققین می‌دهد تا بتوانند وارد حوزه‌های دشوارتر که امکان مطالعه تجربی آن‌ها به سادگی امکان‌پذیر نیست، بشوند. با توجه به کاهش عمق براده‌برداری تا حد چند نانومتر در این فرآیند، امکان استفاده از روش اجزاء محدود وجود نخواهد داشت. علت این موضوع عدم کارایی روابط پیوستگی در ابعاد نانو و مقیاس اتمی می‌باشد. اخیراً روش هیدرودینامیک ذرات هموار<sup>۲</sup> برای شبیه‌سازی فرآیندهای ماشینکاری مورد توجه قرار گرفته است [۱۶ و ۱۷]. مبنای این روش استفاده از توابع لاگرانژ تکامل یافته و حذف مش‌بندی است. مزیت این تکنیک حذف مشکل اعوجاج مش‌ها در تغییر شکل‌های بزرگ (مخصوصاً در فرآیندهایی مانند ماشینکاری) می‌باشد. با این حال از آنجایی که این روش نیز بر مبنای مکانیک محیط پیوسته توسعه یافته است، امکان استفاده از آن برای عمق ماشینکاری و شعاع لبه ابزار نانومتری وجود نخواهد داشت. روش جایگزین برای مطالعه مکانیزم ماشینکاری در ابعاد نانو، تکنیک دینامیک مولکولی می‌باشد. این روش بر پایه تعاملات بین‌اتمی و معادلات حرکت آن‌ها، استوار است [۱۸]. در روش دینامیک مولکولی، با مشخص شدن موقعیت، سرعت و شتاب ذرات، می‌توان رفتار سیستم را پیش‌بینی نمود. در این قسمت از مقاله، نمونه‌ای از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی فرآیند ماشینکاری

نوک ابزار، ارتعاشات اسپیندل و ارتعاشات چتر<sup>۱</sup>. با توجه به تأثیر این عوامل بر کیفیت قطعه کار نهایی، تاکنون تحقیقات بسیاری در زمینه شبیه‌سازی و آزمایش‌های تجربی صورت پذیرفته است. وحدتی و رسولی [۱۵] به شبیه‌سازی ارتعاشات میز هوایی در ماشین‌ابزار فوق‌دقیق پرداختند. آن‌ها نشان دادند که میزان ارتعاشات دستگاه به فشار و سرعت هوای ورودی در ریل‌ها بستگی دارد. آخوندزاده و وحدتی [۱۳ و ۱۴] تأثیر هندسه، اندازه، عمق و تعداد حوضچه هوایی را بر ارتعاشات اسپیندل ماشین‌ابزار فوق‌دقیق بررسی نمودند. نتایج آن‌ها مشخص کرد که استفاده از اسپیندل سرعت‌پایین با ۲ حوضچه هوایی دایروی/مستطیلی، کمترین ارتعاشات را ارائه خواهد داد.

با توجه به فناوری بسیار بالا و کاربردهای خاص دستگاه ماشینکاری فوق‌دقیق، دسترسی کشور به این ماشین همواره محدود بوده و این فرآیند بطور کامل شناخته نشده است. در این پژوهش بطور خلاصه به معرفی فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق و عوامل مؤثر بر صافی سطح نهایی پرداخته شده است. در ادامه، مجموعه‌ای از شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی جهت بررسی شعاع نسبی ابزار بر مکانیزم براده‌برداری و کیفیت سطح انجام پذیرفت. بعلاوه، این پارامتر بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور، شکل براده‌ها، پروفیل دوبعدی و همچنین پروفیل سه‌بعدی سطح مورد بررسی گردیدند.

2 Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

1 chatter vibration



شکل ۳: تأثیر شعاع نسبی ابزار بر مکانیزم براده برداری.

Fig. 3. Effect of effective tool sharpness on cutting mechanism.

قبل از شروع فرآیند ماشینکاری، کل سیستم تحت دو مرحله کمینه‌سازی قرار گرفت. مرحله نخست، پس از تعریف مدل هندسی مسئله و مرحله دوم کمینه‌سازی، پس از جابجایی ابزار تا عمق مورد نظر بود. پس از اتمام کمینه‌سازی دوم، کل سیستم به مدت ۲۵ پیکوثانیه بدون هیچ حرکتی رها شد تا تعادل نهایی حاصل گردد. ماشینکاری در عمق براده‌برداری ۰/۷۵ الی ۳ نانومتر و به طول ۲۰ نانومتر انجام پذیرفت. تمام شرایط شبیه‌سازی بصورت کدنویسی در محیط نرم‌افزار لمپس<sup>۲</sup> و با گام زمانی ۱ فمتوثانیه انجام پذیرفت [۲۲]. همچنین جهت نمایش موقعیت ذرات، از نرم‌افزار اوویتو<sup>۳</sup> استفاده گردید [۲۳]. این شبیه‌سازی‌ها در سیستم رایانه‌ای دانشگاه کیو با ۴۸ هسته انجام پذیرفت. مدت میانگین هر تحلیل حدود ۳۶ ساعت بود.

#### ۲-۲- نتایج شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

شکل ۳ تأثیر شعاع نسبی ابزار بر مکانیزم براده‌برداری را نشان می‌دهد. شعاع نسبی ابزار<sup>۴</sup> برابر با نسبت عمق براده‌برداری به شعاع لبه ابزار می‌باشد [۲۴]. مکانیزم غالب در شرایط  $RTS=0.25$  اکستروژن می‌باشد. تحت این شرایط، یک زاویه پیشانی منفی بزرگ (متفاوت با زاویه پیشانی ابزار) ایجاد شده و قسمت کمی از ذرات پیش روی ابزار به سمت بالا رفته و تشکیل براده‌ای کوچک می‌دهند. مابقی ذرات پیش روی ابزار نیز با فشار از زیر ابزار عبور کرده و توسط قسمت زیرین ابزار اکستروژن می‌گردند [۲۵]. از آنجایی که در عمق‌های کمتر ماشینکاری هیچگونه براده‌برداری صورت نخواهد گرفت [۲۶]، می‌توان

فوق‌دقیق سیلیکون تک کریستال آورده شده است.

#### ۱-۲- شرایط شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

شکل ۲ شمایی مدل سه‌بعدی دینامیک مولکولی را در این تحقیق نشان می‌دهد. قطعه‌کار موجود از جنس سیلیکون تک کریستال با صفحه کریستالی (۰۰۱) می‌باشد. به منظور جلوگیری از حرکت قطعه‌کار، سه لایه اتمی به صورت ثابت تعریف گردیده‌اند (اتم‌های قرمز رنگ). همچنین دمای سه لایه اتمی با استفاده از روش مقیاس‌دهی<sup>۱</sup>، ثابت نگاه داشته شده است (اتم‌های آبی رنگ) [۱۹]. این کار جهت وارد کردن اثرات انتقال حرارت حاصل از براده‌ها می‌باشد [۲۰]. جهت ماشینکاری بصورت [۰ - ۱۰] و با استفاده از ابزار الماس با شعاع لبه ۳ نانومتر اعمال شده است. با توجه به استحکام بالای این ماده و مسافت کوتاه ماشینکاری در این تحقیق، این ابزار بصورت صلب (و بدون ساییش) در نظر گرفته شده است. این رویکرد، روشی مرسوم در مطالعات دینامیک مولکولی فرآیند ماشینکاری نانومتری می‌باشد. با توجه به اتخاذ این راهبرد، اندرکنشی بین اتم‌های کربن موجود در ابزار تعریف نشده است. جهت تعریف اندرکنش اتم‌های سیلیکون و ابزار الماس از تابع پتانسیل ترسوف، مطابق با رابطه (۱) استفاده شده است [۲۱].

$$E = \sum_i E_i = \frac{1}{2} \sum_i \sum_{j \neq i} U(r_{ij}) \quad (1)$$

که در آن  $E$  برابر با انرژی کل سیستم و  $U(r_{ij})$  برابر با انرژی

پیوندی اتم‌ها می‌باشد.

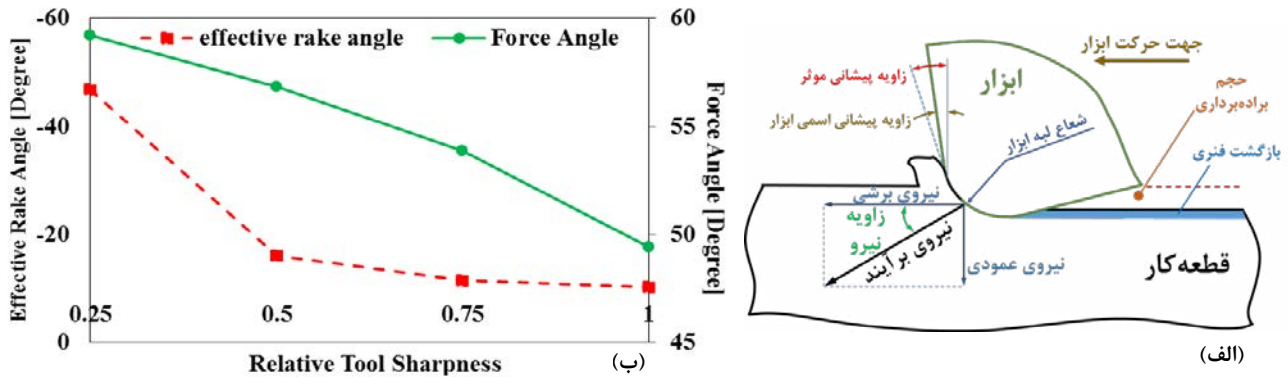
2 LAMMSPS

3 OVITO

4 Relative Tool Sharpness (RTS)

1 Scaling





شکل ۴: الف- مکانیزم براده برداری نانومتری، ب- تأثیر شعاع نسبی ابزار بر زاویه پیشانی موثر و زاویه نیروی ماشینکاری.  
**Fig. 4.a) Nanoscale cutting mechanism, b. Influence of RTS on effective rake angle and force angle.**

جریان اتم‌ها بوده و عمل براده برداری را انجام خواهد داد. نتایج زاویه نیرو نیز تقریباً روندی مشابه را نشان می‌دهد. در مکانیزم اکستروژن تعداد زیادی از اتم‌های پیش روی ابزار، بصورت فشرده شده (اکستروژن شده) از زیر ابزار عبور کرده و سطح ماشینکاری جدید را تشکیل می‌دهند. همین فشار زیاد سبب افزایش زاویه نیرو تا بیشینه مقدار خود شده است. با افزایش عمق ماشینکاری، درصد بیشتری از اتم‌های پیش روی ابزار به براده تبدیل شده و همین سبب کاهش زاویه نیرو می‌گردد.

### ۳- آزمایش‌های تجربی

#### ۳-۱- تجهیزات مورد استفاده

در این مقاله از ویفر سیلیکونی خالص نوع P با ابعاد ۶۰×۶۰ و صفحه کریستالی (۱۱۰) جهت آزمایش‌های تجربی استفاده گردید. ابزار برشی بکار رفته در این تحقیق، از نوع الماس تک‌کریستال با شعاع دماغه ۱۰<sup>۳</sup> میلی‌متر، شعاع لبه ۱۰۰<sup>۴</sup> نانومتر، زاویه پیشانی ۰ و زاویه لقی ۸ درجه و ساخت کارخانه الماس توکیو بود (شکل ۵). استفاده از زاویه پیشانی صفر و منفی، سبب ماشینکاری رژیم نرم<sup>۵</sup> مواد ترد نیمه‌رسانا مانند ژرمانیوم و سیلیکون می‌گردد [۲۷].

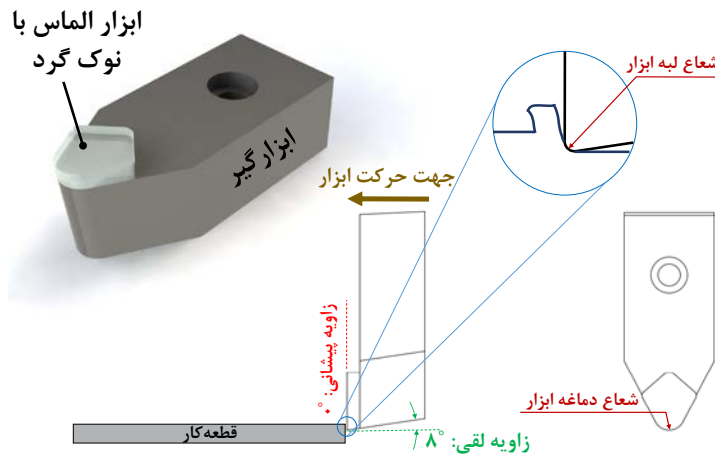
دستگاه ماشین ابزار فوق‌دقیق سه‌محوره، از نوع ناچی<sup>۶</sup> و ساخت کشور ژاپن بود. این دستگاه شامل دو میز حرکت خطی می‌باشد که

شعاع نسبی ۰/۲۵ را بعنوان حداقل عمق براده برداری در فرآیند ماشینکاری نانومتری معرفی کرد. در مقادیر کمتر از این شعاع نسبی، دیگر براده‌ای تشکیل نشده و مکانیزم شخم‌زنی برقرار خواهد بود. با افزایش شعاع نسبی ابزار به ۰/۵، مکانیزم برش، مطابق با ماشینکاری سنتی، آغاز می‌گردد. تحت این شرایط، حجم بیشتری از اتم‌های سطحی ماشینکاری شده تبدیل به براده گردیده‌اند. با افزایش شعاع نسبی ابزار تا میزان ۱ (شکل ۳ پ)، مشاهده می‌گردد که همچنان مکانیزم برش برقرار بوده و با توجه به عمق بیشتر ابزار، حجم بیشتری از براده تولید گردیده است. نکته جالب توجه از بررسی توپوگرافی سطح این است که تحت این شرایط، با افزایش عمق ماشینکاری در مکانیزم برش، تغییر چندانی در کیفیت سطح ماشینکاری شده رخ نمی‌دهد.

همانطور که در شکل ۴ (الف) نشان داده شده است، با توجه به کوچک بودن عمق براده برداری در ماشینکاری نانومتری، زاویه پیشانی مؤثر<sup>۱</sup>، متفاوت با زاویه پیشانی ابزار خواهد بود. مقدار زاویه پیشانی مؤثر ابزار را می‌توان با استفاده از بردار لحظه‌ای جایجایی اتم‌ها در نرم‌افزار اوویتو مشخص کرد. مطابق شکل ۴ (ب)، بیشترین زاویه پیشانی مؤثر در عمق‌های پایین‌تر رخ می‌دهد. همچنین مشاهده می‌گردد که با افزایش شعاع نسبی ابزار تا مقدار ۱، این پارامتر برابر با زاویه اسمی پیشانی ابزار<sup>۲</sup> (۱۰°-) گردیده است. دلیل این موضوع تغییر مکانیزم ماشینکاری از حالت نانومتری به سمت میکرومتری می‌باشد. تحت این شرایط، به جای لبه ابزار، پیشانی ابزار در تماس با

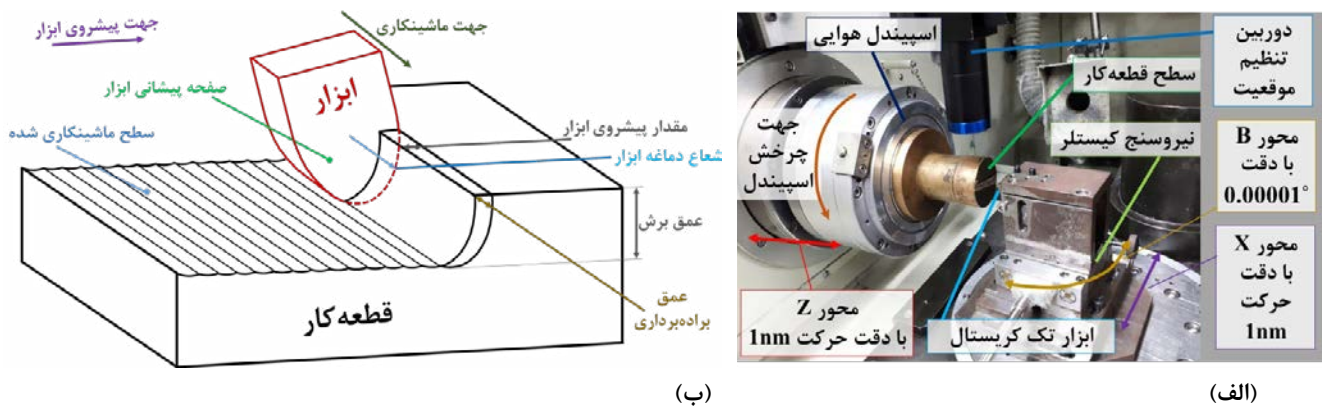
3 Tool nose radius  
 4 Tool edge radius  
 5 Ductile mode machining  
 6 Nachi

1 Effective rake angle  
 2 Nominal rake angle



شکل ۵: هندسه ابزار شعاعی زینتر شده به یک شفت استیل.

Fig. 5. Schematic diagram of a round-nosed diamond tool sintered to a steel shank



شکل ۶: الف- نمای داخلی از ماشین ابزار ۳ محوره فوق دقیق کیو ژاپن، ب- مکانیزم براده برداری.

Fig. 6. Interior view of the 3-axis control ultra-precision machine (Keio University), b. mechanism of material removal.

کیفیت سطح استفاده کرد. در این تحقیق، جهت اندازه‌گیری پروفیل سطح ماشینکاری شده از دستگاه اندازه‌گیری فوق‌دقیق دوبعدی (با دقت  $100 \text{ nm}$ ) و تداخل‌سنج نورسفید<sup>۲</sup> (با امکان بررسی سطح با ابعاد  $360 \mu\text{m} \times 360 \mu\text{m}$ ) استفاده گردید (شکل ۷). همچنین به منظور بررسی پیکربندی براده‌ها، از دستگاه میکروسکوپ الکترونی اسکن میدان<sup>۳</sup> مدل Inspect F۵۰ بهره گرفته شد.

#### ۲-۳- روند انجام آزمایش‌ها

با توجه به قابلیت پیشروی ماشین ابزار فوق‌دقیق در ابعاد نانومتری،

با استفاده از سرووموتور بر بستر یاتاقان‌های هیدرواستاتیکی حرکت می‌کند. دقت حرکتی میزهای خطی ۱ نانومتر و دقت چرخشی میز دوار  $0.00001^\circ$  به ازای هر گام حرکتی می‌باشد. در شکل ۶ نمای از این دستگاه و همچنین مکانیزم براده‌برداری حاصل از آن، آورده شده است.

ویفر سیلیکون با استفاده از یک لایه موم با دمای ذوب  $130^\circ\text{C}$  درجه‌ی سانتیگراد بر روی یک جیگ مسی نصب گردیده و این جیگ توسط مکش بر روی گیره خلاء<sup>۱</sup> سوار شد.

با توجه به ظرافت قطعات تولید شده با استفاده از فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق، بایستی از تجهیزات خاص و پیشرفته نیز جهت اندازه‌گیری

2 White light interferometer  
3 Field-Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM)

1 Vacuum chuck



(ب)



(الف)

شکل ۷: تجهیزات اندازه‌گیری غیر تماسی در این تحقیق: الف- دستگاه اندازه‌گیری دوبعدی، ب- دستگاه تداخل‌سنج نور سفید.

Fig. 7. Non-contact measurement instruments: a. ultra-precision point autofocus 2D probe, b. white light interferometer.

براده‌برداری ۲ برابر حالت قبل گردیده است، می‌توان نتیجه گرفت که حداقل ضخامت براده از حالت بحرانی خارج گردیده و نسبت به نیروی ماشینکاری واکنشی نشان نمی‌دهد. با رسیدن شعاع نسبی ابزار به ۱، شکل پیوسته براده‌ها همچنان باقی مانده است. با این حال با بزرگنمایی سطح مشاهده می‌گردد که این براده‌ها بصورت پیوسته نبوده و حالت نانوبُران گرفته‌اند. با توجه به کاربرد نانوبُران‌های سیلیکونی در صنایع پیشرفته مانند میکرو-ترانزیستورها [۲۹]، می‌توان این روش را به عنوان مکانیزمی جدید و کارآمد جهت تولید این ذرات معرفی کرد.

در شکل ۹ تغییرات عمق ماشینکاری ویفر سیلیکونی در نرخ‌های مختلف برش نشان داده شده است. با توجه به محدودیت طولی موجود در شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی، این نتایج می‌تواند اطلاعات مفیدی را در ارتباط با تأثیر بازه‌ی نسبتاً طولانی ماشینکاری ارائه دهد. علیرغم اینکه عمق برش برابر با ۵ میکرون اعمال گردیده بود، ملاحظه می‌گردد که با پیشروی ابزار، همواره این عمق در حال بیشتر شدن است. این موضوع به دو دلیل رخ می‌دهد. نخست آنکه با شروع ماشینکاری مقداری براده در لبه ابزار ایجاد شده و بر کیفیت مسیر پیش روی ابزار تأثیر می‌گذارد. با پیشروی بیشتر ابزار، مقدار این براده‌ها نیز بیشتر شده و تحت فشار مضاعفی قرار می‌گیرند. این امر سبب اتصال دائمی مقداری از براده‌ها بر روی لبه ابزار<sup>۳</sup> خواهد شد.

مقدار عمق براده‌برداری<sup>۱</sup> متفاوت با عمق برش<sup>۲</sup> خواهد بود. بمنظور بررسی تأثیر شعاع نسبی ابزار، از سه عمق براده‌برداری ۰٫۲۵، ۰٫۵۰ و ۱٫۰۰ نانومتر استفاده گردید (شعاع نسبی ۰٫۲۵، ۰٫۵۰ و ۱). عمق برش در تمامی شرایط یکسان و برابر با ۵ میکرومتر اعمال گردید. همچنین، سرعت ماشینکاری در هر سه آزمایش برابر با ۵۰ متر بر ثانیه بود. این کار با تغییر سرعت چرخش اسپیندل در قطرهای مختلف از ویفر سیلیکونی انجام پذیرفت.

### ۳-۳- نتایج آزمایش‌های تجربی

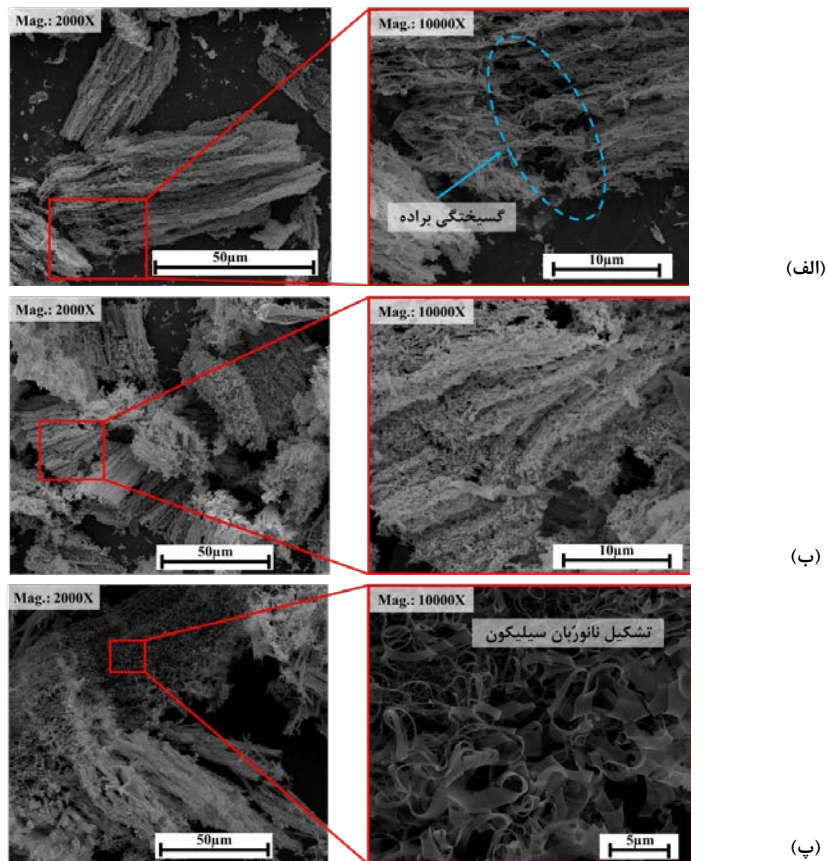
شکل ۸ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از براده‌های ماشینکاری را در شعاع نسبی مختلف نشان می‌دهد. اگرچه سیلیکون ماهیتی ترد دارد، با این حال مطابق شکل ۸ (الف)، شعاع نسبی ۰٫۲۵ سبب ایجاد براده‌های پیوسته گردیده است. با این حال گسیختگی‌های پراکنده‌ای در یکی از گوشه‌های براده دیده می‌شود. از آنجاییکه ضخامت براده در پهنای آن متفاوت است، تمرکز تنش در ناحیه ابتدایی که ضخامت کمتری دارد، بیشتر بوده و همین سبب وقوع پارگی در این ناحیه می‌گردد [۲۸].

با افزایش شعاع نسبی ابزار به ۰٫۵۰، براده‌ها همچنان بصورت پیوسته باقی مانده‌اند؛ با این تفاوت که دیگر هیچ گسیختگی‌ای بر روی براده‌ها دیده نمی‌شود. با توجه به اینکه در این شرایط عمق

1 Undeformed chip thickness

2 Depth of cut

3 Chip adhesion



شکل ۸: تصویر FE-SEM از براده تولیدشده در شعاع نسبی ابزار الف- ۰/۲۵، ب- ۰/۵۰ و پ- ۱.

شکل ۸: تصویر FE-SEM از براده تولیدشده در شعاع نسبی ابزار الف- ۰/۲۵، ب- ۰/۵۰ و پ- ۱.

Fig.8. Field Emission Scanning Electron Microscopy micrograph of chips obtained at RTS of a. 0.25, b. 0.5 and c. 1.

بازه زبری سطح قله تا دره، مربوط به حالت  $RTS=1$  می‌باشد. این موضوع به دو دلیل سایش ابزار و دیگری عمق بزرگ براده‌برداری رخ داده است. تغییرات زبری سطح در راستای ماشینکاری، می‌تواند به دلیل چسبندگی ذرات بر روی لبه ابزار رخ داده باشد.

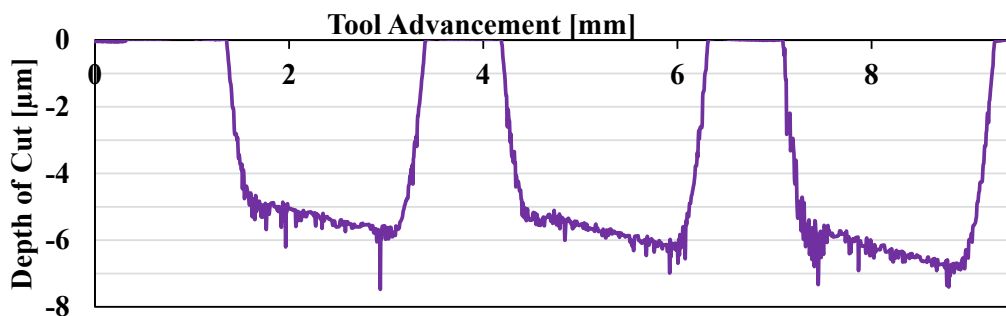
#### ۴- جمع‌بندی

در این مقاله به معرفی فرآیند ماشینکاری فوق‌دقیق قطعات پرداخته شد. همچنین شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و آزمایش‌های تجربی بر روی ویفر سیلیکونی تک‌کریستال انجام پذیرفت. اهم نتایج به شرح ذیل می‌باشند:

- اگرچه ساختمان کلی دستگاه ماشین‌ابزار فوق‌دقیق شبیه به دیگر ماشین‌های ابزار می‌باشد، اما مکانیزم حرکتی و دقت ابعادی آن متفاوت و در مقیاس نانو می‌باشد. از جمله این مکانیزم‌ها می‌توان

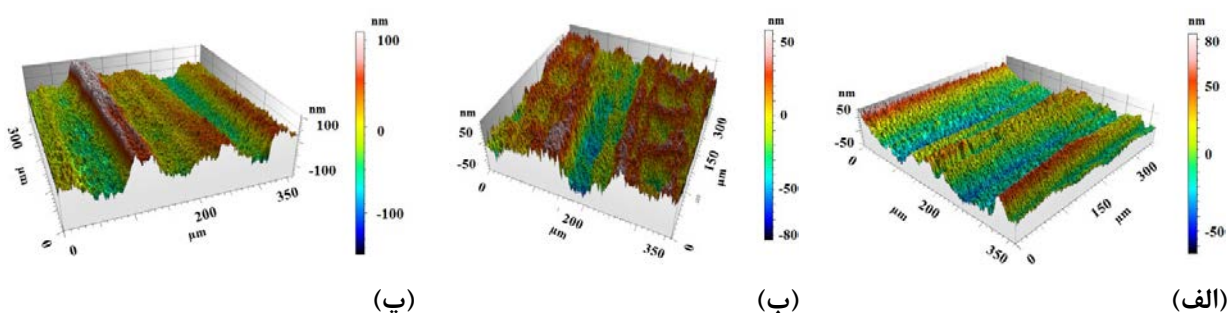
پس از اتمام هر مرحله از ماشینکاری، دستگاه متوقف و لبه ابزار تمیز گردید. با این حال به دلیل این اتصال براده‌ای، شروع عمق ماشینکاری در شیار بعدی، کمی بیشتر از ۵ میکرون بوده است. از طرف دیگر، این ابزار در کل ۲۱۰ متر ماشینکاری انجام داده است. علیرغم استحکام بالای ابزارهای الماس تک‌کریستال، این ابزارها نیز پس از چنین طول ماشینکاری دچار سایش می‌گردند [۳۰]. همین موضوع دلیلی دیگر بر کاهش کیفیت سطح ماشینکاری با پیشروی ابزار می‌باشد.

شکل ۱۰ پروفیل سطح ماشینکاری شده تحت شعاع‌های نسبی مختلف ابزار را در مقیاس میکرومتر نشان می‌دهد. کمترین زبری سطح در حالت  $RTS=0.5$  رخ داده است. همانطور که پیشتر در شکل ۱۰ (ب) نشان داده شد، در این حالت براده‌ها کاملاً بصورت پیوسته و بدون هیچگونه گسیختگی می‌باشند. لذا سطح قطعه کار نوسانات نیرویی کمتری متحمل شده و کیفیت بهتری خواهد داشت. بیشترین



شکل ۹: تغییرات عمق براده برداری در شعاع نسبی ابزار ۰/۲۵، ۰/۵۰ و ۱ با استفاده از دستگاه اندازه گیری فوق دقیق دوبعدی.

Fig. 9. Variation of depth of cut at RTS of 0.25, 0.5 and 1, measured by the ultra-precision point autofocus 2D probe.



شکل ۱۰: پروفیل سطح حاصل از تداخل سنج نور سفید در شعاع نسبی ابزار الف-۰/۲۵، ب-۰/۵۰، و پ-۱.

Fig. 10. Surface topographies obtained by white light interferometry at RTS of: a. 0.25, b. 0.5 and c. 1.

بر این، مقداری چسبش براده بر روی لبه‌ی ابزار الماس نیز مشاهده گردید که این باعث تغییرات زبری سطح در راستای ماشینکاری می‌شود.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از آزمایشگاه ماشینکاری دقیق دانشگاه کیو ژاپن جهت در اختیار قرار دادن سیستم ساخت‌افزار رایانه‌ای و همچنین تجهیزات آزمایشگاهی دارند.

### مراجع

- [1] E. Brinksmeier, Diamond Machining, Encyclopedia of Production Engineering, Eds. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [2] G. P. H. Gubbels, Diamond turning of glassy polymers, Citeseer, 2006.
- [3] G. Chapman, Ultra-precision Machining Systems;

به یاتاقان‌های هوایی و هیدرواستاتیک اشاره داشت.

- نتایج شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مشخص نمود که حداقل شعاع نسبی ابزار جهت براده برداری برابر با ۰/۲۵ می‌باشد. در این حالت زاویه پیشانی مؤثر بسیار بزرگتر از زاویه پیشانی ابزار بوده و مکانیزم براده برداری بصورت اکستروژن خواهد بود.
- تبدیل مکانیزم براده برداری اکستروژن به برش خالص، در شعاع نسبی ۰/۵ به وقوع می‌پیوندد. در این شرایط، زاویه پیشانی مؤثر به زاویه پیشانی اسمی ابزار نزدیک شده و حجم بیشتری از ذرات پیش روی ابزار به براده تبدیل می‌گردد.
- علیرغم ترد بودن سیلیکون، نتایج آزمایش‌های تجربی نشان داد که در شعاع نسبی ابزار کمتر از ۱، مکانیزم براده برداری به صورت نرم بوده و براده‌ها بصورت پیوسته خواهند بود. با این حال، بهترین صافی سطح در شعاع نسبی ۰/۵۰ حاصل می‌گردد.
- علیرغم استفاده از ابزار الماس تک کریستال، وقوع ساییش در این ابزار اجتناب‌ناپذیر بوده و کیفیت سطح را کاهش می‌دهد. علاوه

- (2014) 681–686.
- [15] M. Vahdati, and S. A. Rasouli, Vibration Simulation of Air Slide Table in Ultra Precision Machines, *Applied Mechanics and Materials*, 66–68 (2011) 2158–2163.
- [16] A. Mir, X. Luo, and A. Siddiq, Smooth particle hydrodynamics study of surface defect machining for diamond turning of silicon, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88 (9–12) (2017) 2461–2476.
- [17] A. Mir, X. Luo, K. Cheng, and A. Cox, Investigation of influence of tool rake angle in single point diamond turning of silicon, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94 (5–8) (2018) 2343–2355.
- [18] M. P. Allen and D. J. Tildesley, *Computer simulation of liquids*. Oxford university press, 1989.
- [19] S. Z. Chavoshi, S. Goel, and X. Luo, Influence of temperature on the anisotropic cutting behaviour of single crystal silicon: A molecular dynamics simulation investigation, *Journal of Manufacturing Processes*, 23 (2016) 201–210.
- [20] S. V. Hosseini and M. Vahdati, Modeling the effect of tool edge radius on contact zone in nanomachining, *Computational Materials Science*, 65 (2012) 29–36.
- [21] J. Tersoff, New empirical approach for the structure and energy of covalent systems, *Physical Review B*, 37(12) (1988) 6991–7000.
- [22] S. Plimpton, Fast Parallel Algorithms for Short-Range Molecular Dynamics, *Journal of Computational Physics*, vol. 117, no. 1, pp. 1–19, Mar. 1995.
- [23] A. Stukowski, Visualization and analysis of atomistic simulation data with OVITO-the Open Visualization Tool, *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, 18(1) (2010).
- [24] A. V. Outeiro JC, The role of the relative tool sharpness in modelling of the cutting process, *Proc Eighth CIRP Int Workshop Model Mach Oper*, 517–524, 2005.
- [25] S. To, C. F. Cheung, and W. B. Lee, Influence of material swelling on surface roughness in diamond turning of single crystals, *Journal of Materials Science* an Enabling Technology for Perfect Surfaces, *Moore Nanotechnology System*, (2015) 1–9.
- [4] N. Taniguchi, Current status in, and future trends of, ultraprecision machining and ultrafine materials processing, *CIRP Annals*, 32(2) (1983) 573–582.
- [5] E. Brinksmeier, *Ultraprecision Machining*, *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, Berlin, (2014) 1277–1280.
- [6] E. Brinksmeier, Y. Mutlugünes, F. Klocke, J. C. Aurich, P. Shore, H. Ohmori, *Ultra-precision grinding*, *CIRP Annals*, 59(2) (2010) 652–671.
- [7] M. Heidari, J. Yan, *Ultraprecision surface flattening of porous silicon by diamond turning*, *Precision Engineering*, 49 (2017) 262–277.
- [8] W. A. Gross, Investigation of whirl in externally pressurized air-lubricated journal bearings, *Journal of Basic Engineering*, 84(1) (1962) 132–138.
- [9] D. J. Whitehouse, *Handbook of surface metrology*. CRC Press, 1994.
- [10] M. Moradi, O. Mehrabi, T. Azdast, K. Y. Benyounis, Enhancement of low power CO2 laser cutting process for injection molded polycarbonate, *Optics & Laser Technology*, 96 (2017) 208–218.
- [11] C. Cheung, W.B . Lee, Characterisation of nanosurface generation in single-point diamond turning, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(6) (2001) 851–875.
- [12] Q. Gao, L. Lu, W. Chen, G. Wang, Influence of air-induced vibration of aerostatic bearing on the machined surface quality in ultra-precision flycutting, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*, 232(2) (2017) 117-125.
- [13] M. Akhondzadeh, and M. Vahdati, Air pocket effects on air spindle vibrations in nanomachining, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J*, 228 (3) (2013) 328–336.
- [14] M. Akhondzadeh, and M. Vahdati, Study of variable depth air pockets on air spindle vibrations in ultra-precision machine tools, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 73 (5–8)

- [28] M. Heidari and J. Yan, Nanometer-scale chip formation and surface integrity of pure titanium in diamond turning, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95 (1–4) (2018) 479–492.
- [29] N. Elfström, A. E. Karlström, and J. Linnros, Silicon nanoribbons for electrical detection of biomolecules, *Nano Letters*, 8 (3) (2008) 945–949.
- [30] M. Heidari and J. Yan, Material removal mechanism and surface integrity in ultraprecision cutting of porous titanium, *Precision Engineering*, 52 (2018).
- & *Technology*, 17(1) (2001) 102–108.
- [26] M. A. Rahman, M. R. Amrun, M. Rahman, and A. S. Kumar, Variation of surface generation mechanisms in ultra-precision machining due to relative tool sharpness (RTS) and material properties, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 115 (2017) 15–28.
- [27] D. a. Lucca, P. Chou, and R. J. Hocken, Effect of Tool Edge Geometry on the Nanometric Cutting of Ge, *CIRP Annals*, 47(1) (1998) 475–478.

